

# 基于阵列波导光栅与光环形器的多波长窄线宽掺铒光纤激光器

刘志明<sup>1,2</sup> 陈坤峰<sup>1,2</sup> 高业胜<sup>2</sup> 简水生<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555  
<sup>2</sup> 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555  
<sup>3</sup> 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

**摘要** 提出一种结构简单有效的多波长窄线宽掺铒光纤激光器,该结构激光器以阵列波导光栅作为梳状滤波器,以光环形器作为全反射腔镜,解决了传统线型腔掺铒光纤激光器中的模式竞争以及两个布拉格波长对准的问题。基于此结构,设计并制作出了一个双波长窄线宽掺铒光纤激光器。实验表明:该激光器在室温下可实现 1554.872 nm 和 1555.671 nm 处双波长输出,平均输出光功率分别为 -9.7 dBm 和 -9.6 dBm,光谱半峰全宽 (FWHM) 小于 0.010 nm,边模抑制比大于 50 dB,具有良好的波长稳定性和功率稳定性。该方案为多波长光纤激光器的制作提供了一个良好的选择。

**关键词** 光纤激光器;掺铒光纤;阵列波导光栅;多波长

**中图分类号** TN929.11;TN15 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s102005

## A Narrow-Line-Width Multi-Wavelength Erbium-Doped Fiber Laser Based on Arrayed-Waveguide Grating and Optical Circulator

Liu Zhiming<sup>1,2</sup> Chen Kunfeng<sup>1,2</sup> Gao Yesheng<sup>2</sup> Jian Shuisheng<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao, Shandong 266555, China  
<sup>2</sup> The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China  
<sup>3</sup> Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** A novel multi-wavelength erbium-doped fiber laser with narrow-line-width lasing output is proposed and demonstrated using arrayed-waveguide grating (AWG) and optical circulator (OC). Wavelength competition and consistency are naturally prevented in this kind of laser by using AWG as comb filter and OC as completely reflecting mirror in the linear-cavity. As an example, a dual-wavelength erbium-doped fiber laser is experimentally investigated. Using the laser scheme, the proposed laser can generate two wavelengths simultaneously. The fiber laser realizes the optical side-mode suppression ratio of over 50 dB and the average output power of -9.7 dBm and -9.6 dBm at 1554.872 nm and 1555.671 nm, respectively. The full width at half maximum (FWHM) of the spectrum of each laser is less than 0.010 nm. Moreover, the output power stability of the laser has also been measured and analyzed. Experiment results show that the laser can operate in stable narrow-line-width with dual-wavelength output at room temperature.

**Key words** fiber laser; erbium-doped fiber; arrayed-waveguide grating; multi-wavelength

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 230.7370

**收稿日期**: 2013-10-20; **收到修改稿日期**: 2013-11-08

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB328206)、国家 863 计划(2008AA01Z15)、国家自然科学基金(60771008)、重点实验室基金(9140C120301130C12051)

**作者简介**: 刘志明(1982—),男,博士,高级工程师,主要从事应用于下一代光网络的新型特种光纤及其相关器件等方面的研究。E-mail: lzmskyweilai@163.com

# 1 引 言

波长间隔固定的多波长掺铒光纤激光器(MW-EDFL)能应用于密集波分复用(DWDM)的光纤通信系统、光学传感器以及光学测量仪器中,近年来引起了众多学者极大的兴趣<sup>[1-12]</sup>。由于掺铒光纤(EDF)在室温下具有很宽的增益谱,其可以覆盖通信用C和L波段,因此成为了通信用激光器的最佳增益介质之一。但是在抽运光作用下,室温下的掺铒光纤属均匀加宽增益介质,在谐振腔内存在强烈的模式竞争,因而激光振荡很不稳定,要实现多个波长的同时稳定激射具有很大的难度<sup>[13-14]</sup>。目前报道的用于抑制波长竞争的方法有很多种,如利用多量子阱波导、双芯掺铒光纤、多模光纤、声光调制器、椭圆芯光纤及将掺铒光纤置于液氮中等方法<sup>[2]</sup>。但 these 方法都具有结构复杂,制作难度大,制作成本高 等缺点。多波长光纤激光器一般分线型腔和环型腔两种:环型腔结构复杂,并且模式锁定易受环型腔长度影响<sup>[15]</sup>;相较环型腔而言,线型腔结构简单、且性能稳定,但存在两个光纤布拉格光栅(FBG)的布拉格波长对准这一问题。

基于此,本文提出了一种新型的 MW-EDFL,采用线型腔结构,以阵列波导光栅(AWG)作为梳状滤波器、以光环形器(OC)作为全反射腔镜,解决了传统线型腔多波长掺铒光纤激光器中的模式竞争以及两个布拉格波长对准的问题。这种方法具有结构简单、所用器件工艺水平成熟、输出稳定等特点。采用此结构,制作出了一种双波长窄线宽掺铒光纤激光器(DW-EDFL),并对其波长稳定性、功率稳定性

进行了分析,最后就 AWG 对激光器阈值和抽运效率的影响做了研究。

# 2 实验装置及原理

图 1(a)为这种激光器的结构示意图,其由 OC、一个  $1 \times N$  路 AWG、光隔离器(OI)、 $N$  段 EDF,  $N$  个均匀布拉格光栅(UFBG),  $N$  个 980/1550 nm 耦合器和 980 nm 半导体激光器(LD)抽运源组成,为线型腔结构。OC 采用 2 端口与 3 端口通过跳线相连接的方式,就形成了一个宽带宽全反射器,可作为该激光器的全反射腔镜。AWG 的一字端与 OC 相连接,每个交叉端分别配置一个反射波长与 AWG 该通道中心波长相同的 UFBG, UFBG 作为波长选择性波分反射腔镜腔,与 OC 一起构成该激光器的法布里-珀罗(F-P)谐振腔,由于每个线型腔采用独立的 EDF 作为增益介质,  $N$  路 AWG 就可提供  $N$  个不同的激射波长。AWG 在腔内起梳状滤波器及合波/分波器的作用,从而避免了各个激射波长之间的能量耦合,因此该结构从本质上具有抑制多波长激射时模式竞争的能力,可以提供稳定且波长可选的多波长激光输出。同时利用 OC 作为全反射腔镜,不仅能够有效提高激光抽运效率<sup>[16]</sup>,同时还使得激光器每个谐振器只需要一个 UFBG 便可确定谐振波长,实现激光输出,不存在传统线型腔光纤激光器中两个 FBG 的布拉格波长对准的问题,因此该激光器同时具有环型腔与线型腔的优点,在减小制作难度的同时,增加了激光器的稳定性,更容易实现高质量的窄线宽激光输出。

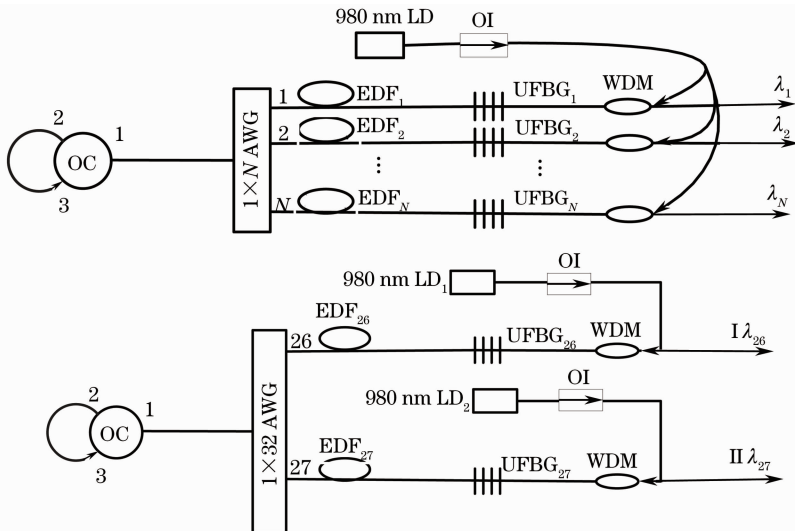


图 1 基于 AWG 和 OC 的多波长掺铒光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of MW-EDFL using AWG and OC

为了验证此结构的可行性,本文从  $N$  路线型腔中任意选择 2 路为例制作了基于该法的双波长窄线宽掺铒光纤激光器,结构如图 1(b) 所示。选用 AXON 公司的  $1 \times 32$  路商用 AWG(型号: No. DWDM-F-100 G-1-32-C-FC-002),其中 26 和 27 通道作为验证通道,其传输谱如图 2 所示:光谱半峰全宽(FWHM)约为 0.6 nm,通道间隔 0.8 nm。实际测量 AWG 两通道的温度特性,其环境温度在  $0 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$  变化时,中心波长及 FWHM 随温度的变化分别为约  $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  与  $-0.0001 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ ,具有比较好的温度稳定性。考虑到 AWG 的特性,制作了两个 UFBG(UFBG26 和 UFBG27);其中 UFBG26 的反射波长与 AWG 第 26 通道的中心波长相对应,为 1554.871 nm,UFBG27 的反射波长与 AWG 第 27 通道的中心波长相对应,为 1555.673 nm。增益介质采用北京交通大学光波技术研究所自行研制的高浓度 EDF,其 1530 nm 处的吸收系数为 53 dB/m,背景损耗在 1200 nm 处为 5.088 dB/km,两段 EDF 长度均为 1.2 m。为方便调节,采用两个最大输出功率为 250 mW 的 LD 通过 980/1550 nm 的波分复用器(WDM)对各通道进行抽运。激光器中 AWG 与其他光纤采用法兰连接,其插入损耗为 0.2 dB;激光器中所采用的光纤

除 EDF 外均为标准 G. 652 光纤。激光器输出的光谱由 AQ6319 光谱分析仪进行监测和分析,测量精度为 0.010 nm。

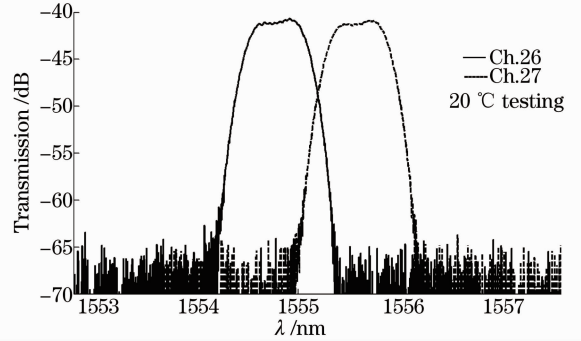


图 2 AWG 通道传输谱

Fig. 2 Transmission spectra of AWG used in experiments

### 3 实验结果及其讨论

当抽运  $LD_1$  和  $LD_2$  输出功率分别为 130 mW 和 140 mW 时激光器振荡于 1554.872 nm 和 1555.671 nm 处,平均输出功率分别为  $-9.7 \text{ dBm}$  和  $-9.6 \text{ dBm}$ ,激光器 FWHM 均在 0.010 nm 以下,边模抑制比大于 50 dB,如图 3 所示。当增大抽运功率时,激光器输出功率随之提高,考虑到所采用的抽运源在全功率输出时会有输出功率不稳定的问题,因此调节抽运功率使激光输出稳定在  $-10 \text{ dBm}$ 。

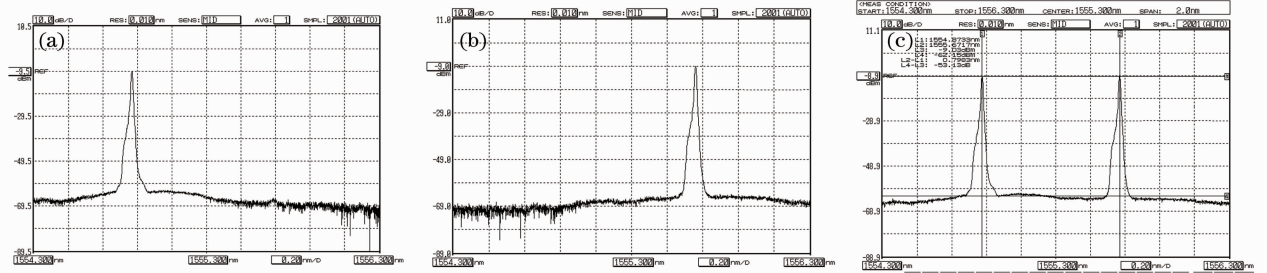


图 3 双波长激光器激光输出光谱。(a) Ch. 26 通道; (b) Ch. 27 通道; (c): 双波长激光

Fig. 3 Dual-wavelength output of the proposed laser. (a) Ch. 26; (b) Ch. 27; (c) dual-wavelength oscillation

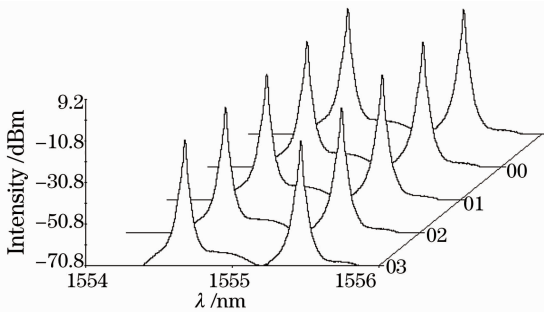


图 4 双波长激光输出周期性测试图

Fig. 4 Repeatedly scanned output spectra of the dual-wavelength oscillation

为了研究激光器的稳定性,以 10 min 为测量间隔对激光器的输出进行了连续 60 次测量,结果如图 4~6 所示。测试结果显示:1554.872 nm 与 1555.671 nm 处中心波长最大漂移分别为 0.005 nm 和 0.003 nm,输出功率波动均在 0.3 dBm 以内,这与目前报道相比具有较好的稳定性<sup>[14]</sup>。

下面分析一下 AWG 对激光器阈值及其抽运效率的影响,选择通道 26 作为研究对象,实验结果如图 7 所示。实验发现:线型腔中加入 AWG,使得激光器的阈值增大,并且斜率效率有所下降。不难理解,AWG 作为一个无源有损耗的集成光波导器件

插入谐振腔中,不可避免地会引起激光器阈值的增加及其抽运效率的下降。

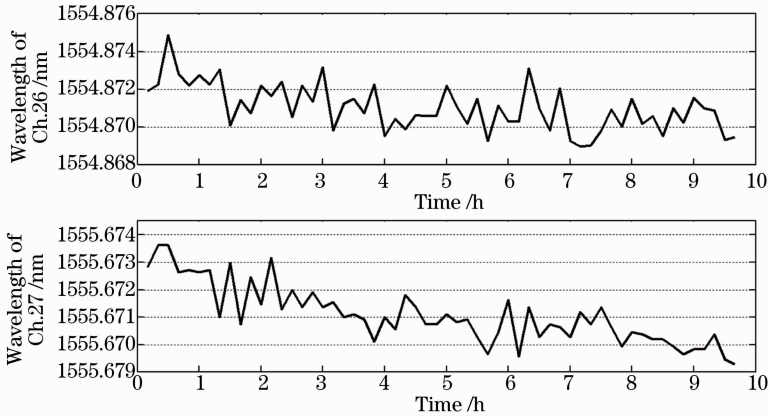


图 5 激光输出中心波长漂移测试图

Fig. 5 Drift of each laser wavelength

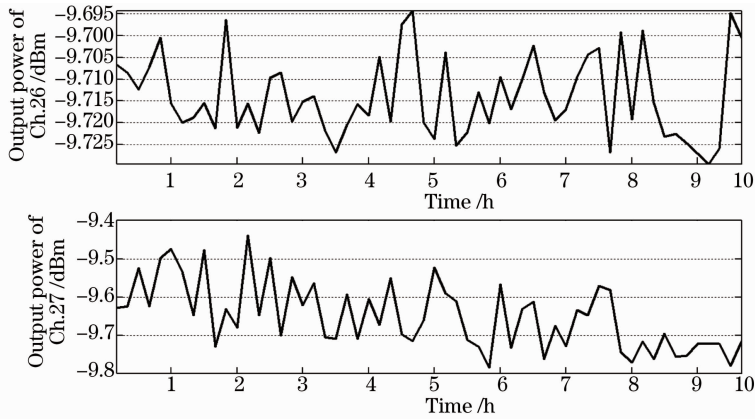


图 6 激光输出功率稳定性测试图

Fig. 6 Output power variation of each laser wavelength

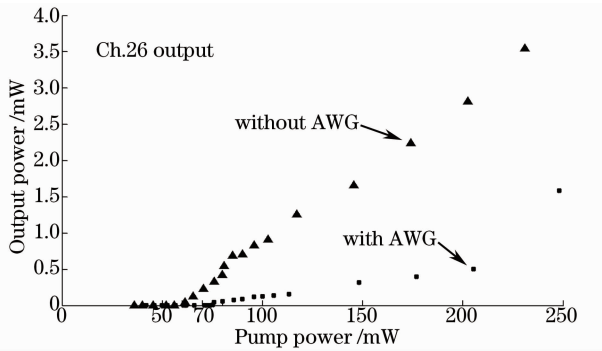


图 6 Ch. 26 通道激光输出与抽运功率关系图

Fig. 6 Output power of Ch. 26 laser versus the input pump power

## 4 结 论

提出了一种新型的基于 AWG 与 OC 的 WM-EDFL 实现方法,与传统结构相比较,该方法具有结构简单、所选器件工艺成熟、无模式竞争、无布拉格波长对准、输出稳定等优点,这为 WM-EDFL 的制

作提供了一个良好的选择。基于这种结构,利用自制的高浓度 EDF、UFBG 和商用的  $1 \times 32$  路 AWG,实现了一种稳定输出的双波长激光器。实验数据表明:该激光器在室温下可实现 1554.872 nm 和 1555.671 nm 波长处稳定激光输出,平均光功率分别为  $-9.7$  dBm 和  $-9.6$  dBm,激光输出 FWHM 在 0.010 nm 以下,边模抑制比 50 dB 以上。室温下经过稳定性测试,结果显示该激光器波长漂移在 0.005 nm 以内,功率波动在 0.3 dBm 以内,具有很好的稳定性,但由于 AWG 的引入,导致激光器腔内损耗增大,因此该激光器较无 AWG 时会阈值升高,斜率效率降低。

## 参 考 文 献

- 1 Chien Hung Yeh, Fu Yuan Shih, Chang Tai Chen, *et al.*. Triple-wavelength erbium fiber ring laser based on compound-ring scheme[J]. Opt Express, 2007, 15(26): 17980-17984.
- 2 Dae Seung Moon, Un-Chul Paek, Youngjoo Chung, *et al.*. Multi-wavelength linear-cavity tunable fiber laser using a chirped fiber Bragg grating and a few-mode fiber Bragg grating[J]. Opt

- Express, 2005, 13(15): 5614–5620.
- 3 Ning Tigang, Liu Yan, Pei Li, *et al.*. Stable two wavelength fiber laser with strict polarization [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007, 28(1): 16–18.  
宁提纲, 刘艳, 裴丽, 等. 单偏振的双波长光纤激光器的实验研究[J]. 半导体光电, 2007, 28(1): 16–18.
  - 4 Wang hua, Yao Minyu, Zhang Hongming, *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(11): 1503–1506.  
王华, 姚敏玉, 张洪明, 等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(11): 1503–1506.
  - 5 An H L, Lin X Z, Pun E Y B, *et al.*. Multi-wavelength source operation of an erbium-doped fiber ring using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter[J]. Opt Commun, 1999, 169(1-6): 159–165.
  - 6 J M Battiato, T F Morse, R K Kostuk. Dual-wavelength common-cavity codoped fiber laser[J]. IEEE Photonics Technol Lett, 1997, 9(7): 913–915.
  - 7 X P Dong, S Li, K S Chiang, *et al.*. Multiwavelength erbium-doped fibre laser based on a high-birefringence fibre loop mirror [J]. Electron Lett, 2000, 36(19): 1609–1610.
  - 8 J Yang, K Zhou, Y Liu, *et al.*. Multiwavelength linear-cavity fiber laser source using a Sagnac interferometric filter and a strain-induced chirped fiber grating[J]. Fiber & Int Opt, 2003, 22(4): 239–247.
  - 9 Jia Xiujie, Liu Yange, Si Libin, *et al.*. A tunable narrow-line-width multi-wavelength Er-doped fiber laser based on a high birefringence fiber ring mirror and an auto-tracking filter[J]. Opt Commun, 2008, 281(1): 90–93.
  - 10 J Yao, J Yao, Y Wang, *et al.*. Active mode locking of tunable multi-wavelength fiber ring laser[J]. Opt Commun, 2001, 191(3-6): 341–345.
  - 11 J Yang, Y Liu, J Yao. Wideband true-time-delay system using fiber Bragg grating prism incorporated with a wavelength tunable fiber laser source [C]. Proceedings of IEEE, Microwave Photonics MWP2001, 2001. 125–128.
  - 12 Chien-Hung Yeh, Fu-Yuan Shih, Chang-Tai Chen, *et al.*. Stabilized dual-wavelength erbium-doped dual ring fiber laser[J]. Opt Express, 2007, 15(21): 13844–13848.
  - 13 V Mizrahi, D J DiGiovanni, R M Atkins, *et al.*. Stable singlemode erbium fiber-grating laser for digital communication [J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(12): 2021–2025.
  - 14 C Barnard, P Myslinski, J Chrostowski, *et al.*. Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(8): 1817–1830.
  - 15 Daru Chen, Shan Qin, Sailing He. Channel-spacing-tunable multi-wavelength fiber ring laser with hybrid Raman and Erbium-doped fiber gains[J]. Opt Express, 2007, 15(3): 930–935.
  - 16 Liaw S K, Jang W Y, Wang C J, *et al.*. Pump efficiency improvement of a C-band tunable fiber laser using optical circulator and tunable fiber gratings[J]. Appl Opt, 2007, 46(12): 2280–2285.

栏目编辑:殷建芳